

CORROSÃO INTERGRANULAR EM JUNTAS SOLDADAS - PARTE III

Eng. Ricardo Fedele, MSc.

*Engenheiro de Aplicação da Boehler Thyssen Técnica de Soldagem Ltda
Prof. do Dep. de Eng. Mecânica e Metalúrgica da Escola de Engenharia Mauá
engenharria@btwbr.com.br*

(Artigo publicado na Revista Soldagem & Inspeção – Ano 6. Nº 5)

Parte III - Técnicas de prevenção da corrosão intergranular

Conforme discutido na Parte I, a corrosão intergranular pode evoluir de maneira imperceptível até o colapso total do equipamento. Nestes casos, verifica-se que o material estava submetido à um processo corrosivo somente após sua fratura e conseqüente inutilização. Assim, as técnicas de prevenção da corrosão intergranular assumem um importante papel na maximização da vida útil dos componentes soldados.

Entretanto, sabe-se que o sucesso de qualquer ação preventiva depende da correta identificação das causas do problema a ser evitado. Por este motivo, o estudo dos principais mecanismos de corrosão intergranular, apresentado na Parte II, será utilizado como ponto de partida para a discussão das técnicas de prevenção.

Em princípio, pode-se prevenir a corrosão intergranular em juntas soldadas através da utilização de procedimentos de soldagem adequados, do emprego de materiais especiais e da execução de tratamentos térmicos pós soldagem.

3.1 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM ADEQUADOS

Conforme apresentado na Parte II, os mecanismos de corrosão intergranular de sensitização e de dissolução de precipitados são ativados pela formação de fases secundárias na microestrutura das juntas soldadas. O aparecimento destas fases está diretamente associado à composição química do metal-base, às temperaturas máximas atingidas pela zona afetada pelo calor (ZAC) e à velocidade de resfriamento destas regiões após a soldagem.

No entanto, estas condições de temperatura e de velocidade de resfriamento dependem da quantidade de calor efetivamente transferida para junta durante a soldagem, a qual recebe o nome de energia de soldagem (*heat input*). Na prática, esta energia pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$E = \eta \cdot \frac{I \cdot V}{v} , \text{ onde:}$$

E = Energia de soldagem (J/mm)

η = Eficiência térmica do processo de soldagem (%)

I = Corrente de soldagem (A)

V = Tensão de soldagem (V)

v = Velocidade de soldagem (mm/s)

Assim, a utilização de baixos valores de energia promove a transferência de quantidades reduzidas de calor à junta, contribuindo para a diminuição das temperaturas máximas atingidas pela ZAC e para o aumento da velocidade de resfriamento destes locais. Tais condições dificultam a precipitação de novas fases na microestrutura do componente soldado, evitando a corrosão intergranular.

Segundo a equação acima, baixos valores de energia podem ser obtidos através do simples ajuste dos parâmetros de soldagem. Assim, recomenda-se utilizar baixas correntes, baixas tensões e elevadas velocidades de avanço.

O emprego de processos de soldagem que apresentam baixa eficiência térmica também contribui para a redução da quantidade de calor transmitida à junta. Em uma soldagem por arco submerso, por exemplo, aproximadamente 99% de toda a energia térmica gerada pela fonte de calor é transferida à junta. Já no caso da soldagem por TIG, esta transferência está em torno de 30-60%. A Tabela 5 relaciona as eficiências térmicas dos processos de soldagem mais utilizados na indústria.

Tabela 5- Eficiências térmicas dos principais processos de soldagem

Processo de soldagem	Eficiência térmica (%)
Laser, feixe de elétrons	5-20
TIG	30-60
Plasma	50-60
MIG	70-80
Eletrodo revestido	80-90
Arco submerso	90-99

Além disso, todas as outras formas de concentração de calor no metal de base devem ser evitadas. Recomenda-se, portanto, não utilizar o préaquecimento da junta e controlar a temperatura máxima interpasse em torno de valores bem abaixo da faixa de temperatura de precipitação das fases secundárias prejudiciais a resistência à corrosão.

3.2 MATERIAIS ESPECIAIS

Os aços inoxidáveis são os materiais mais utilizados atualmente na construção de peças e equipamentos que devam combinar boas propriedades mecânicas à elevados valores de resistência à corrosão. Dentre este amplo conjunto de ligas, destaca-se o grupo dos aços inoxidáveis austeníticos, o qual é largamente aplicado em quase todos os setores industriais, representando 65-70% do total de aços inoxidáveis produzidos.

No entanto, estas ligas apresentam elevada susceptibilidade à corrosão intergranular, principalmente quando soldadas. Tal característica está associada à precipitação de carbonetos de cromo do tipo $M_{23}C_6$ na microestrutura do material. Estes carbonetos são responsáveis por ativar o mecanismo de corrosão intergranular de sensitização, conforme discutido na Parte II.

Visando eliminar este problema metalúrgico, duas classes de materiais foram especialmente desenvolvidas: os aços inoxidáveis austeníticos da série “L” (*low carbon*) e os aços inoxidáveis austeníticos estabilizados da série “S” (*stabilized*).

Os aços inoxidáveis austeníticos da série “L” (*AISI 304L/316L...*) apresentam teores bastante reduzidos de carbono (<0,03%) quando comparados aos aços inoxidáveis austeníticos convencionais (<0,08%). A redução da quantidade deste elemento tem o objetivo de minimizar a precipitação de carbonetos de cromo na microestrutura do material, evitando a sensitização e, conseqüentemente, a corrosão intergranular.

Já no caso dos aços inoxidáveis austeníticos estabilizados, a prevenção da corrosão é obtida de outra maneira. Estas ligas possuem certos teores de nióbio (*AISI 347*), titânio (*AISI 321*) ou tântalo em suas composições químicas, os quais reagem com o carbono do aço, formando carbonetos do tipo MC (*NbC, TiC, TaC*).

A precipitação destas fases ocorre através de tratamentos térmicos específicos realizados durante o processo de fabricação do aço. Ela tem o objetivo de consumir grande parte dos teores de carbono da liga, reduzindo a probabilidade de formação de carbonetos de cromo $M_{23}C_6$ em aplicações posteriores. Conseqüentemente, estes aços apresentam elevada resistência à corrosão, mesmo quando utilizados nas temperaturas de precipitação dos carbonetos de cromo.

No entanto, o processo de soldagem pode comprometer as excelentes características de resistência à corrosão destes aços, ativando um tipo de degradação muito particular denominado *corrosão em linha de faca*. Este fenômeno pode ser melhor entendido através do exemplo para aços estabilizados ao nióbio, representado na Figura 12.

Durante a soldagem, determinadas regiões da junta, adjacentes ao cordão de solda, podem atingir a faixa de temperatura de dissolução dos carbonetos NbC. Nestes locais, portanto, o

carbono separa-se do elemento estabilizante Nb, permanecendo livre na microestrutura do aço.

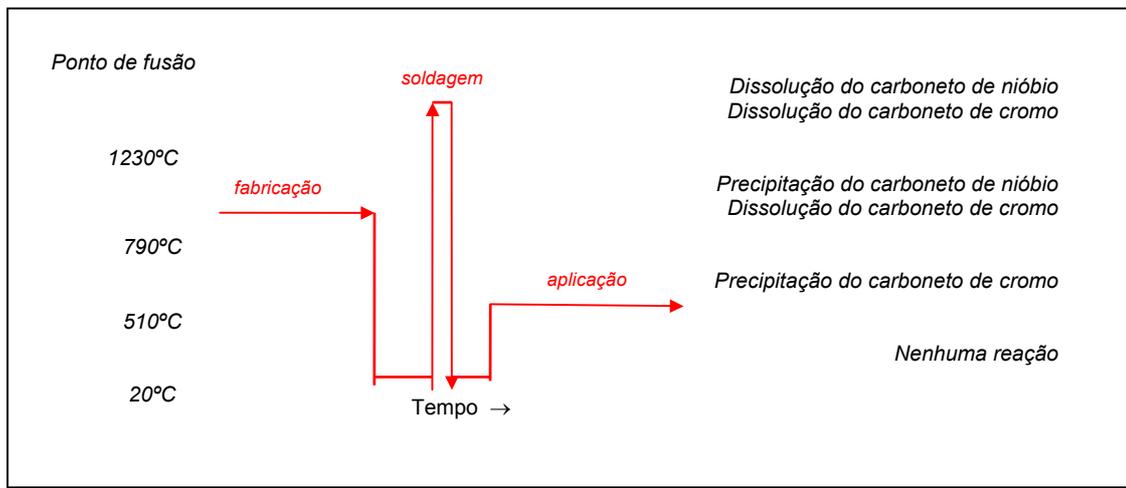


Figura 12 - Representação esquemática do perfil de temperatura da zona de ligação de uma junta soldada de aço estabilizado ao nióbio, destacando as causas da corrosão em linha de faca.

Caso este componente soldado seja utilizado em temperaturas de 500-800°C, carbonetos de cromo precipitarão em sua microestrutura. Conseqüentemente, a formação destas fases pode ativar o mecanismo de corrosão por sensitização na estreita faixa microestrutural, adjacente ao cordão de solda, conforme representado na Figura 13. A morfologia bastante estreita e alongada da região deteriorada explica o nome *linha de faca* dado a este fenômeno. Como exemplo, a Figura 14 mostra a corrosão em linha de faca ocorrida em uma junta soldada de aço estabilizado tratada termicamente à 600°C e submetida a um meio ácido bastante agressivo.

Em geral, pode-se evitar a corrosão em linha de faca através da redução da quantidade de calor fornecida à junta. Assim, a zona de ligação tende a apresentar taxas de resfriamento bastante elevadas, não permitindo a dissolução completa dos carbonetos MC. Recomenda-se também utilizar tratamentos térmicos pós soldagem que promovam a precipitação de carbonetos estabilizantes, recuperando as propriedades de resistência à corrosão do material. Esta técnica será discutida mais adiante.

É importante ressaltar que os aços inoxidáveis estabilizados devem ser soldados com consumíveis também estabilizados. Assim, recomenda-se empregar metais de adição ligados ao nióbio, titânio ou tântalo. No entanto, devido à elevada reatividade do titânio com o oxigênio da atmosfera do arco, prefere-se comumente os consumíveis estabilizados ao nióbio. O teor deste elemento deve ser o mais próximo possível da quantidade requerida para fixar o carbono (em peso, utiliza-se a relação Nb/C=8). Nióbio em excesso pode tornar o metal de solda susceptível a trincas.

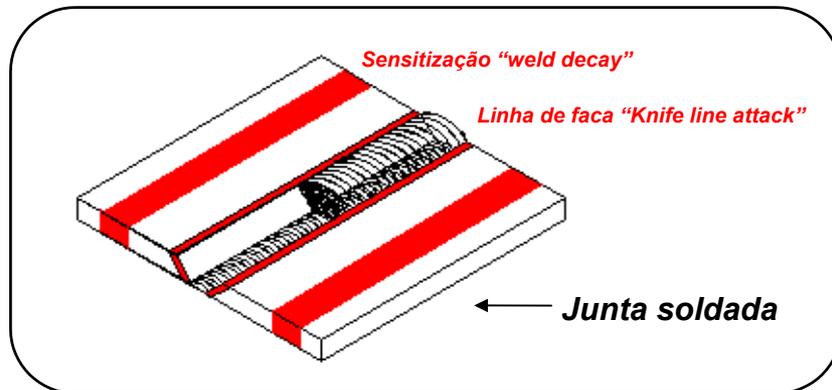


Figura 13 - Representação esquemática dos locais de ocorrência da corrosão intergranular em juntas soldadas, evidenciando as diferenças entre a corrosão por sensização convencional (weld decay) e a corrosão em linha de faca (Knife line attack).

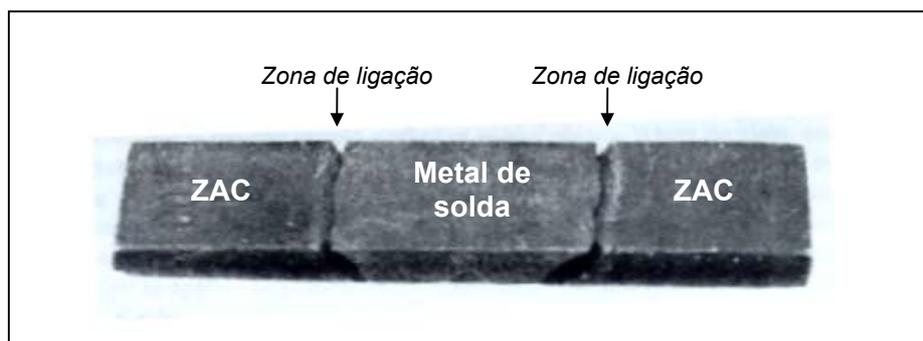


Figura 14- Corrosão em linha de faca. Junta soldada de aço inoxidável 18/8 Mo estabilizado ao titânio após tratamento térmico à 600°C e ensaio em solução 65% ácido nítrico

A utilização de metais de adição indicados para aços inoxidáveis convencionais também não é recomendada. Ela pode gerar um metal de solda susceptível à formação de carbonetos de cromo, sensitizando a junta. Assim, a correta escolha dos consumíveis pode contribuir para o aumento da vida útil do componente soldado. No caso de dúvidas quanto a seleção de metais de adição, gases, fluxos, etc, recomenda-se sempre consultar os fabricantes destes insumos.

3.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS PÓS SOLDAGEM

Em princípio, a realização dos tratamentos térmicos pós soldagem pode apresentar três objetivos quanto a corrosão: solubilizar as fases secundárias indesejáveis, homogeneizar os teores de elementos passivadores na matriz metálica ou favorecer a precipitação de fases

secundárias que contribuem para o aumento da resistência à corrosão do material. Caso tenha ocorrido a precipitação de fases secundárias indesejáveis na microestrutura da junta durante a soldagem, recomenda-se realizar o tratamento térmico de solubilização do componente soldado antes de colocá-lo em serviço. Este tratamento deve ser executado em temperaturas superiores àquelas de precipitação da fase que se deseja dissolver. Em seguida, aconselha-se promover o resfriamento rápido do componente para que novas precipitações sejam evitadas.

Os tratamentos térmicos pós soldagem de solubilização, realizados comercialmente em aços inoxidáveis austeníticos, por exemplo, visam dissolver os carbonetos de cromo $M_{23}C_6$. Eles consistem no aquecimento do material até temperaturas na faixa de 1065-1120°C, seguido de resfriamento em água. No entanto, em determinados materiais, pode-se também realizar um tratamento térmico pós soldagem para homogeneizar a composição química da matriz metálica, sem que haja a dissolução dos precipitados. Neste tratamento, a energia térmica fornecida ao material ativa a difusão dos elementos químicos passivadores, fazendo com que eles migrem das regiões centrais dos grãos em direção às regiões empobrecidas, adjacentes aos precipitados. Assim, pode-se elevar a resistência mecânica da liga através da precipitação de fases secundárias, sem que haja uma redução nas propriedades de resistência à corrosão.

No caso da precipitação de fase sigma em juntas de aços inoxidáveis austeníticos, por exemplo, pode-se utilizar um tratamento térmico pós soldagem de solubilização na temperatura de 1230°C ou apenas de homogeneização a 1030°C. No entanto, ambos os tratamentos citados devem ser seguidos de resfriamento rápido até temperaturas abaixo de 550°C para evitar novas precipitações.

Existem ainda os tratamentos térmicos pós soldagem associados à precipitação de fases que favorecem o aumento da resistência à corrosão do material. Conforme discutido anteriormente, a presença de carbonetos estabilizantes MC evita a formação de fases ricas em cromo nos aços inoxidáveis estabilizados. No entanto, estes carbonetos podem ser dissolvidos durante a soldagem. Nestes casos, recomenda-se normalmente a execução de um tratamento térmico pós soldagem na temperatura de ~1060°C, com o objetivo de reativar a formação dos carbonetos estabilizantes MC na microestrutura, recuperando as propriedades de resistência à corrosão do componente soldado.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as técnicas de prevenção contra a corrosão intergranular apresentadas são importantes e merecem uma profunda reflexão. A elaboração de procedimentos de soldagem adequados, a utilização de materiais especiais com os devidos cuidados e a aplicação de tratamentos térmicos pós soldagem devem ser consideradas como ferramentas para evitar a corrosão intergranular em juntas soldadas. Entretanto, a utilização de cada uma delas dependerá do correto levantamento de dados e do estudo de cada caso em particular.